

University of Groningen

Dynamics and stellar populations of small stellar systems

Brok, Mark den

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2012

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Brok, M. D. (2012). *Dynamics and stellar populations of small stellar systems*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Nederlands samenvatting

Melkwegstelsels

Dit proefschrift beschrijft onderzoek naar elliptische dwergmelkwegstelsels. Vanwege de voor veel mensen enigzins esoterische aard van dit soort objecten, is het goed om uit te leggen wat precies een melkwegstelsel is. Melkwegstelsels zijn wolken van miljoenen tot duizenden miljarden sterren. In zo'n wolk bewegen de sterren, grotendeels gedreven door hun onderlinge aantrekkingskracht, langs elkaar heen.

Twee soorten melkwegstelsels zijn algemeen bekend. Het eerste type melkwegstelsel staat bekend als spiraalstelsel. Spiraalstelsels bevatten, naast sterren, een grote hoeveelheid interstellair gas en stof. Uit dit gas en stof kunnen nieuwe sterren worden gevormd en de aanwezigheid van veel jonge sterren geeft deze melkwegstelsels een enigzins blauwe kleur. Omdat wij spiraalstelsels onder verschillende inclinatiehoeken zien en soms zelfs van de zijkant, weten wij dat de sterren en het gas zich ophouden in een platte, schijfvormige vorm. Onze zon bevindt zich ook in een spiraalstelsel, dat door de schijfvorm als een band aan de hemel verschijnt: de melkweg. Metingen aan de snelheden van sterren en gas in spiraalstelsels tonen aan dat sterren en gas in spiraalstelsels op hoge snelheid om het centrum van het melkwegstelsel roteren.

In het midden van de schijf van spiraalstelsels ziet men vaak een verdikking. De sterren in deze verdikking, in het Engels aangeduid met de naam *bulge*, hebben minder impulsmoment dan de sterren in de schijf, en bewegen zich daardoor in chaotischer banen. De sterren in de *bulge* zijn gemiddeld wat ouder dan de sterren in de schijf, waardoor de *bulge* vaak een wat gelige kleur heeft.

Het tweede bekende type melkwegstelsel is het elliptische melkwegstelsel, zo genoemd vanwege de vorm, die aandoet als een afgeplatte bol. Door naar de afplatting van grote aantallen elliptische melkwegstelsels te kijken, heeft men bepaald dat deze melkwegstelsels een intrinsieke oblaat-ellipsoidale vorm hebben, d.w.z. zij zijn

pilvormig. Deze melkwegstelsels vertonen enige gelijkenis met de *bulges* die men in spiraalstelsels vindt. Over het algemeen zijn de kleuren van elliptische stelsels geler dan de kleuren van spiraalstelsels, omdat er weinig nieuwe sterren worden gevormd.

Grote elliptische en spiraalstelsels mogen het prominentst vertegenwoordigd zijn op astronomische foto's, in aantal worden zij vele malen overtroffen door dwergmelkwegstelsels. Er bestaat geen goede definitie voor dwergmelkwegstelsels, maar over het algemeen beschouwt men melkwegstelsels waarvan de absolute helderheid, d.w.z. de waargenomen helderheid van het melkwegstelsel gecorrigeerd voor de afstand van het melkwegstelsel, lager is dan een zekere grenswaarde als dwergen.

Ook dwergmelkwegstelsels komen in verschillende types voor: een gasrijk type, waarvan het licht op verschillende plaatsen in het melkwegstelsel opgloeit vanwege de vorming van nieuwe sterren en daarom meestal een onregelmatige vorm heeft, en de gasarme elliptische dwergmelkwegstelsels. Elliptische dwergmelkwegstelsels lijken qua vorm op normale elliptische melkwegstelsels, echter, de verdeling van sterren is veel diffuser dan in elliptische melkwegstelsels, waarin de sterren sterk geconcentreerd zijn rond het centrum.

In hoofdstuk drie van dit proefschrift houden we ons bezig met het bepalen van groottes, massa's en de mate van concentratie van sterrenstelsels, waarbij we twee verschillende methodes vergelijken om deze parameters te bepalen.

Eén van de belangrijkste problemen bij het bestuderen van elliptische dwergmelkwegstelsels, is dat we niet weten waarom er geen gas aanwezig is in deze stelsels. Elliptische dwergmelkwegstelsels vindt men nagenoeg alleen in de buurt van grotere stelsels of in clusters van melkwegstelsels. Het is dus waarschijnlijk dat de omgeving van deze stelsels een rol speelt in de verwijdering van het gas.

De Coma cluster

De dwergmelkwegstelsels die bestudeerd worden in de eerste hoofdstukken van dit proefschrift, bevinden zich in de Coma cluster. De Coma cluster is een grote groep van meer dan duizend sterrenstelsels, die door zwaartekracht langs elkaar heen vliegen, met snelheden die oplopen tot soms meer dan duizend kilometer per seconde. Het is niet ongebruikelijk dat we melkwegstelsels in groepen zien; dit is zelfs wat voorspeld wordt door cosmologische modellen. Sommige groepen van melkwegstelsels bevatten echter zó veel sterrenstelsels dat men er een aparte naam aan heeft gegeven: cluster.

De Coma cluster bevindt zich op een afstand van 300 miljoen lichtjaar. Het licht dat wij nu waarnemen van deze cluster is dus al lang geleden uitgezonden. Er zijn wel andere clusters van melkwegstelsels die dichterbij staan, zoals de Virgo cluster en de Fornax cluster, maar deze clusters bevatten bij lange na niet zoveel melkwegstelsels als de Coma cluster, die in dit opzicht heel bijzonder is.

Naast sterrenstelsels bestaat de cluster ook uit ontzettend heet gas, dat een temperatuur van meer dan een miljoen graden heeft. Hoewel dit gas zeer ijl is, heeft

het een zeer hoge druk. Een van de verklaringen waarom er geen gas aanwezig is in elliptische dwergmelkwegstelsels, is dat het koude gas in deze melkwegstelsels, die met ontzettend hoge snelheid door de cluster bewegen, door de hoge druk van het clustergas uit de sterrenstelsels wordt geblazen. Dit proces wordt in het Engels *Ram Pressure Stripping* genoemd. Een andere verklaring voor de vorm van elliptische dwergmelkwegstelsels heeft te maken met de interactie tussen melkwegstelsels in de Coma cluster: wanneer een klein melkwegstelsel langs een groter melkwegstelsel scheert, kan de zwaartekracht van het grotere stelsel de banen van sterren en gas in het kleine stelsel veranderen. Wat de precieze reden dan ook mag zijn, de melkwegstelsels in het centrum van de Coma cluster zijn bijna zonder uitzondering ofwel elliptische melkwegstelsels ofwel elliptische dwergmelkwegstelsels.

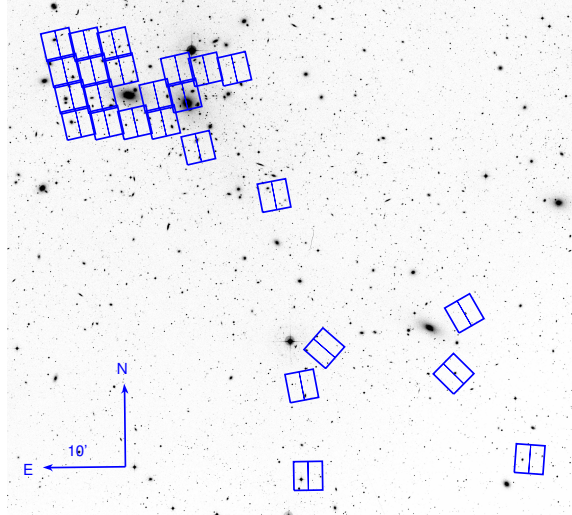
De Coma Cluster HST/ACS Survey

In dit proefschrift analyseren we waarnemingen van melkwegstelsels in de Coma cluster. Deze waarnemingen zijn gedaan door de *Hubble Space Telescope*. Zoals de naam al suggereert, is dit een telescoop die zich in de ruimte bevindt. Dit heeft grote voordelen voor waarnemingen: er is geen atmosfeer die de waarnemingen kan verstoren. Op aarde zorgt de atmosfeer ervoor dat sterren een heel klein beetje heen en weer lijken te springen, waardoor vanaf de aarde genomen foto's van sterrenstelsels altijd enigszins onscherp zijn. *Hubble* heeft dit probleem niet, maar is vergeleken met telescopen op aarde niet erg groot: de diameter is slechts 2.5 meter, terwijl ter vergelijking de diameter van elk van de VLT telescopen in Chili 8.2 meter is. Omdat de scherpte van de telescoop afhangt van de diameter, zouden met telescopen op aarde in principe veel scherpere foto's genomen kunnen worden. De scherpte van de foto's van *Hubble* in de ruimte is zo goed dat we structuren van 100 meter op de maan kunnen onderscheiden. Met een optische telescoop op aarde, zonder correctie voor de atmosfeer, is dit al snel een kilometer.

Met een internationale groep wetenschappers hebben wij de *Hubble* gebruikt om de Coma cluster waar te nemen. Door de grootte van de Coma cluster is het niet mogelijk om dit met een of twee foto's te doen, maar heeft men honderden foto's nodig. Ongelukkigerwijze ging de camera waarmee deze foto's gemaakt moesten worden kapot, nog voordat de hele Coma cluster gefotografeerd was. Gelukkig was het interessantste deel van de cluster, het centrum, toen al grotendeels gedaan, maar we missen dus waarnemingen de buitendelen, zoals het oorspronkelijke plan was (zie figuur 1).

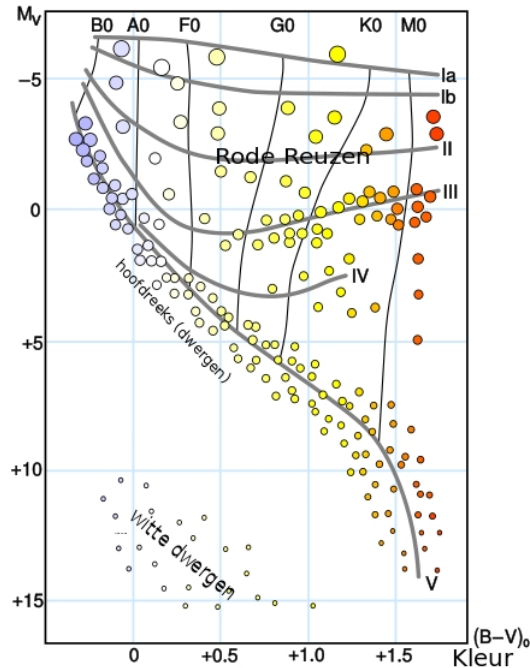
Sterren: de bouwstenen van melkwegstelsels

Zoals reeds uitgelegd bestaan melkwegstelsels uit verschillende ingrediënten: gas, stof, sterren, gestorven sterren en donkere materie. Veel van wat wij leren over melkwegstelsels is afkomstig uit sterlicht, omdat van al het uitgezonden licht, dit verreweg het gemakkelijkst waarneembaar is. Sterren zijn gasbollen, die in het



Figuur 1 — Waargenomen Hubble data van de Coma cluster. Het centrum van de cluster, dat wordt gedomineerd door twee grote elliptische melkwegstelsels, bevindt zich linksboven.

midden zo heet zijn, dat waterstof, het lichtste en meest voorkomende element in het heelal, kan fuseren tot helium. Niet alle sterren hebben dezelfde massa: sommige sterren zijn zwaarder dan de zon, maar de meeste sterren zijn lichter dan de zon. Er zijn echter grenswaarden voor de massa's van sterren. Een te zware ster blaast zichzelf uit elkaar. Een gasbol kan ook net iets te licht zijn: in dit geval zijn de druk en temperatuur aan de binnenkant niet hoog genoeg voor kernfusie. Dergelijke mislukte sterren worden bruine dwergen genoemd. In zware sterren verloopt de kernfusie juist bijzonder goed. Het is dan ook zo dat zware sterren vele malen korter leven dan lichte sterren: hoewel er meer brandstof aanwezig is, verbruikt de ster zoveel meer energie dat de brandstofvoorraad ook eerder opgebruikt is. Omdat zware sterren zeer heet zijn aan de buitenkant, zijn zij blauwer dan lichte sterren. Blauw licht in waarnemingen van sterrenstelsels duidt er dus meestal op dat er jonge



Figuur 2 — Een kleur-helderheiddiagram van sterren. (Bron van de figuur: Wikipedia)

sterren gevormd worden, en omgekeerd, als sterrenstelsels roodgelig zijn, betekent dit meestal dat de sterren lang geleden gevormd zijn. Figuur 2 laat zien hoe sterren van verschillende massa verdeeld zijn over kleur en magnitude. Wanneer sterren gevormd zijn en op normale wijze energie produceren door kernfusie, bevinden zij zich op de hoofdreeks. De zwaartste sterren vindt men aan de linkerkant van het diagram. Als de energie van sterren op begint te raken, verlaten zij de hoofdreeks en bewegen zij zich naar de rechterkant van het diagram. Men kan dus bepalen wat de leeftijd is van een groep sterren door te kijken wat de blauwste ster in de groep is. Coma is echter te ver voor telescopen om nog individuele sterren te onderscheiden. Hier kan men alleen de leeftijd bepalen door naar de 'gemiddelde' kleur van alle sterren te kijken. Er is echter nog een andere factor, naast leeftijd, die de kleur bepaalt van sterren. Behalve uit waterstof en helium bestaan sterren ook uit "metalen". Dit is de astronomische benaming voor alle elementen die zwaarder zijn dan helium. Hoewel deze metalen maar een kleine fractie van de massa in een ster vormen (ongeveer een procent), zijn zij wel belangrijk voor de uiteindelijke kleur van de ster. Er geldt hier dat, des te meer metalen er in de sterren zitten, des te roder de kleur van de ster is. Er zijn dus vaak twee verklaringen voor de kleur van de sterren in sterrenstelsels mogelijk: een sterrenstelsel kan oud zijn en daardoor rood, of de

sterren in een sterrenstelsel kunnen veel metalen bevatten. Door waarnemingen van verschillende kleuren te combineren is het wel mogelijk om onderscheid te maken tussen deze twee mogelijke oorzaken.

Kleurgradiënten in melkwegstelsels

In hoofdstuk twee bestuderen we de kleuren van melkwegstelsels in de Coma cluster. Echter, we kijken daar niet naar de kleur van het totale melkwegstelsel, maar naar de kleur van sterren op verschillende afstanden van het centrum van het melkwegstelsel. Het was reeds bekend dat elliptische melkwegstelsels blauwer zijn aan de buitenkant. Men denkt dat dit komt omdat sterren aan de buitenkant van elliptische melkwegstelsels minder metalen bevatten dan sterren aan de binnenkant.

Er is een eenvoudig model dat deze waarnemingen kan verklaren: een elliptisch sterrenstelsel begint als een gaswolk waarin sterren vormen. Het aanwezige gas in het melkwegstelsel wordt niet volledig gebruikt voor stervorming, en het gas aan de buitenkant van het melkwegstelsel zinkt langzaam naar binnen onder de invloed van de zwaartekracht en wrijving. Zware sterren, die niet heel lang leven, exploderen ondertussen als supernova's en verrijken zo het gas tussen de sterren met metalen die zij hebben geproduceerd door kernfusie. Dit metaalrijke gas vormt weer de basis voor een volgende generatie sterren, die dus meer metalen bevatten. Omdat het gas waar deze nieuwe generatie uit vormt, zich dichter rond het centrum bevindt, bevatten de sterren aan de binnenkant van het stelsel meer metalen dan sterren aan de buitenkant. Doordat dit proces een aantal malen herhaald wordt, bouwt zich een 'metalliciteitsgradiënt' op. Hoe vaak dit proces zich herhaalt hangt af van hoe gemakkelijk het gas door krachtige supernovaexplosies kan worden weggeblazen. Dit is weer afhankelijk van de massa van het melkwegstelsel: het is eenvoudiger om gas weg te blazen uit lichte melkwegstelsels. De voorspelling van dit model is dus ook dat dwergmelkwegstelsels slechts hele zwakke gradiënten zouden moeten hebben.

In hoofdstuk twee vinden we dat ook dwergmelkwegstelsels vaak blauwer zijn aan de buitenkant, en dat de kleurgradiënt sterker is dan modellen voorspellen. Een reden kan zijn dat dwergmelkwegstelsels nog jonge sterren vormen in de buitendelen, maar dit lijkt niet erg waarschijnlijk. Vermoedelijk zijn de modellen voor de vorming van metalliciteitsgradiënten in dwergmelkwegstelsels nog niet goed genoeg om de waarnemingen te kunnen ondersteunen.

Centrale sterclusters

In het centrum van onze melkweg bevindt zich een zwart gat. Hoewel het niet mogelijk is om zwarte gaten direct waar te nemen, kan men kijken naar de snelheden van sterren rond een zwart gat. Onder invloed van de zwaartekracht van het zwarte gat, bewegen zij veel sneller dan normaal. Met deze methode heeft men de massa

van het zwarte gat in het centrum van de melkweg bepaald, die waarschijnlijk een paar miljoen maal groter is dan de massa van de zon. Dergelijke metingen kan men ook uitvoeren op andere nabije melkwegstelsels, en het lijkt erop dat zware melkwegstelsels allemaal een 'superzwaar zwart gat' hebben in het centrum. Voor deze superzware zwarte gaten geldt dat de meest zware zwarte gaten in de meest zware stelsels worden gevonden. Het is echter niet duidelijk wat de situatie is in kleinere melkwegstelsels.

In dwergmelkwegstelsels en sommige spiraalstelsels vindt men centrale sterclusters: een soort bolhopen van sterren. Ook de massa's van deze centrale sterclusters zijn van de orde van miljoenen zonsmassa's. Het is niet duidelijk of deze melkwegstelsels naast deze centrale sterclusters ook nog een zwart gat bevatten, maar het lijkt erop dat in kleinere melkwegstelsels de centrale stercluster het zwarte gat vervangt. Wat precies de reden is waarom zware melkwegstelsels zwarte gaten hebben en minder zware melkwegstelsels centrale sterclusters, is niet helemaal duidelijk. Misschien kan een superzwaar zwart gat een centrale stercluster kapot maken, of andersom, een te zware stercluster kan misschien het begin zijn van een zwart gat. Voor onze eigen melkweg geldt in ieder geval dat er zowel een zwart gat als een centrale stercluster aanwezig zijn.

In hoofdstuk vier van dit proefschrift bestuderen we deze centrale sterclusters in dwergmelkwegstelsels in de Coma cluster. We doen dit onder andere door de grootte en de massa van deze sterclusters te bepalen. Omdat de Coma cluster tamelijk ver weg is, is dit zeker geen gemakkelijke opgave. Echter, we vinden een aantal interessante zaken, die mogelijk kunnen verhelderen hoe de vorming van deze centrale sterclusters in zijn werk gaat.

Het belangrijkste resultaat dat we hebben gevonden, is dat de kleur van de centrale stercluster sterk afhankelijk is van de massa van de stercluster. Dit duidt erop dat zware centrale sterclusters erin slagen om een deel van de zware elementen die in sterren worden gevormd, en die normaal gesproken worden weggeblazen in supernova explosies, vast te houden. Verder vinden we dat de meeste centrale sterclusters een blauwere kleur hebben dan de rest van het melkwegstelsel. Dit duidt erop dat centrale sterclusters sterren bevatten die jonger zijn dan de rest van het stelsel. Als er inderdaad een relatie bestaat tussen superzware zwarte gaten en centrale sterclusters, dan maakt dit de studie van centrale sterclusters zeer belangrijk: immers, door te kijken naar de leeftijden van de sterren in deze sterclusters kunnen we bepalen hoe de centrale stercluster gegroeid is sinds de vorming van het melkwegstelsel, maar dit is uiteraard onmogelijk voor zwarte gaten.

Dynamica van sterren in melkwegstelsels

In het eerste deel van dit proefschrift hebben we voornamelijk gekeken naar waarnemingen van dwergmelkwegstelsels in de Coma cluster. Aan de hand van foto's van deze melkwegstelsels hebben we gekeken naar eigenschappen van deze melkwegstelsels, zoals kleur en grootte. Het licht van deze sterrenstelsels is echter nog verder

te ontleden. Zoals waterdruppels in de atmosfeer op een regenachtige dag het zonlicht kunnen breken in een regenboog, zo kunnen astronomische instrumenten het licht van sterren breken in een spectrum. In een spectrum ziet men vaak absorptielijnen, waar het sterlicht aan de buitenkant van de ster is tegengehouden door atomen of moleculen. Door naar de Doppler-verschuiving van een lijn te kijken kan men de snelheid van een ster bepalen. (Dit is analoog aan de manier waarop de toonhoogte van het geluid van een voorbijkomende ambulance (of racewagen) veranderd.)

In hoofdstuk vijf en zes bestuderen we de snelheden van sterren in vier nabije dwergmelkwegstelsels en een bolhoop van sterren. Door een model te maken van de massa in het melkwegstelsel, kunnen we voorspellen wat de snelheden zijn van sterren in deze melkwegstelsels. De sterren in deze melkwegstelsels bewegen zich nogal chaotisch in vergelijking met de beweging van sterren in spiraalstelsels, die min of meer netjes rond een centrum roteren. Om de bewegingen van sterren in elliptische dwergmelkwegstelsels te vergelijken met modellen, was het in het verleden gebruikelijk om naar de spreiding in snelheden van groepen sterren te kijken, om zo de hoeveelheid 'willekeurige bewegingen' van de sterren te bepalen. In hoofdstuk vijf en zes laten we zien dat een dergelijk procedé niet nodig is, en zelfs onwenselijk, omdat het ten koste gaat van de nauwkeurigheid van de waarnemingen. Verder geven we een aantal toepassingen waarvoor onze nieuwe methode goed geschikt is. Soms is niet duidelijk of een waargenomen ster in een dwergmelkwegstelsel bij het dwergmelkwegstelsels hoort, of een voorgrondster in de melkweg is. Deze nieuwe methode biedt een aantal oplossingen om dat probleem te lijf te gaan.

Naast het toepassen van de methode op dwergmelkwegstelsels, hebben we het toegepast op de bolhoop M15. Dit is een groep van bijna een miljoen sterren, gebonden door hun onderlinge aantrekkingskracht, die rond de melkweg draait. Met onze nieuwe methode vinden we dat de massa in het midden van de bolhoop veel hoger is, dan men aanvankelijk vond met traditionele methodes. Dit zou heel spectaculair verklaard kunnen worden door de aanwezigheid van een zwart gat. Echter, sterrenkundige theorie voorspelt een grote hoeveelheid neutronensterren en witte dwergen (de afvalproducten van stellaire evolutie) in het centrum van deze bolhoop, waardoor er veel meer massa aanwezig is, dan men op basis van alleen het waargenomen licht zou verwachten. Zowel het massaprofiel, als de hoeveelheid massa in het centrum, zijn in perfecte overeenstemming met de theorie en sluiten de aanwezigheid van een zwaar zwart gat min of meer uit.

Toekomstig werk

Men kan ontzettend veel leren over de vormingsgeschiedenis van sterrenstelsels door te kijken naar de bewegingen van de sterren. Om dit écht goed te doen, heeft men een zogenaamde integraal-veldspectrograaf nodig, een type spectrograaf dat tweedimensionale foto's kan ontleden in spectra, en daarmee verschilt van de

klassieke spectrograaf die dat alleen voor eendimensionale foto's kan. Recente waarnemingen van grote elliptische stelsels met de SAURON integraal-veldspectrograaf hebben onze ideeën over de vorming van elliptische sterrenstelsels sterk gewijzigd. Dergelijke waarnemingen zijn ook hard nodig voor dwergmelkwegstelsels. Een zeer goed instrument voor deze waarnemingen is bijvoorbeeld de MUSE integraal-veldspectrograaf, die nu gebouwd wordt voor de *Very Large Telescope* in Chili. Dergelijke waarnemingen zullen ons ook vertellen hoeveel donkere materie er aanwezig is in dwergmelkwegstelsels.

De vorming van centrale sterclusters is nog steeds niet goed begrepen, en er is hier nog veel werk te verrichten. Onlangs is al aangetoond dat sommige centrale sterclusters in spiraalstelsels als een heel klein schijfje roteren in het midden van het sterrenstelsel. Dit soort waarnemingen zijn heel belangrijk om te bestuderen hoe centrale sterclusters vormen, en zouden ook gedaan moeten worden voor dwergmelkwegstelsels.

Een van de interessantste problemen is of er ook zwarte gaten te vinden zijn in de dwergmelkwegstelsels met centrale sterclusters. Wanneer men de resultaten van zwaardere melkwegstelsels extrapoleert naar elliptische dwergmelkwegstelsels, dan verwacht men dat de zwarte gaten in deze melkwegstelsels te licht zijn (tien-duizend tot honderdduizend zonsmassa's) om te kunnen worden waargenomen met conventionele technieken. Als er (middel)zware zwarte gaten aanwezig zijn in deze sterclusters, zullen zij echter eens in de zoveel tijd een ster opslokken. In sommige gevallen zal dit gepaard gaan met een lichtflits, die, hoewel deze flits maar kort duurt, als men maar vaak genoeg kijkt naar mogelijke zwarte gaten, misschien wel wordt waargenomen. Op deze manier kan men toch een indruk krijgen of er zware zwarte gaten aanwezig zijn in dwergmelkwegstelsels met centrale sterclusters.

